جوشکاری همزن اصطکاکی فولاد زنگ نزن فریتی ۴۳۰*

سجاد امامی(۱) توحید سعید(۲) رسول آذری خسروشاهی(۳)

چکیده

جوش بدون درزی بر روی ورق ۲ میلیمتری فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۳۰ با فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی با سرعت چرخشی ۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۵۰ میلیمتر بر دقیقه ایجاد گردید. مشاهدات ریزساختاری نشان داد که در ناحیه ریزساختاری متاثر از عملیات ترمومکانیکی جوش در اثر وقوع مکانیزم بازیابی دینامیکی کسر بزرگی از مرزدانه‌های کوچک زاویه تشکیل شده است. از طرف دیگر در ناحیه همزده جوش در اثر وقوع تبلور مجدد دینامیکی دانه‌های بسیار ریز به همراه کسر بزرگی از مرزدانه‌های بزرگ زاویه ایجاد شده است. همچنین، تصویر قطبی محاسبه شده نشان داد که بافت برشی در ناحیه همزده توسعه یافته است.

واژه‌های کلیدی جوشکاری همزن اصطکاکی، فولاد زنگ‌نزن فریتی، بازیابی دینامیکی، تبلور مجدد دینامیکی، بافت برشی.

Friction Stir Welding of 430 Ferritic Stainless Steel

S. Emami T. Saeid R. Azari khosroshahi

Abstract

Friction stir welding was conducted on a 430 austenitic stainless steel plate with thickness of 2 mm. The welding procedure was performed at a welding speed of 50 mm/min and rotational speed of 400 rpm. Microstructure observations showed high fraction of low angle grain boundaries formed in the thermo mechanically affected zone through the occurrence of dynamic recovery. Severe grain refinement took place in the stir zone with the formation of high fraction of high angle grain boundaries through dynamic recrystallization. Calculated pole figure showed that shear texture developed in the stir zone.

Key words Friction stir welding, Ferritic stainless steel, Dynamic recovery, Dynamic recrystallization, Shear texture.

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۶/۴/۸ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۶/۶/۲۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
(۲)نویسنده مسئول، دانشیار ، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
(۳)استاد ، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

Email: tohid_saeid@yahoo.com

DOI: 10.22067/ma.v30i2.65546

مقدمه

فولادهای زنگ نزن فریتی دسته‌ای از آلیاژهای مهندسی هستند که امروزه به خاطر خواص مکانیکی عالی و همچنین مقاومت بالا در برابر خوردگی به طور گسترده در صنایع مختلفی همچون خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند[1-7]. از این رو نیاز گسترده‌ای برای جوشکاری چنین آلیاژهایی در صنعت وجود دارد. اما متاسفانه به کارگیری روش‌های مرسوم ذوبی با ذوب و انجماد مجدد ریزساختار اولیه فلز را از بین برده و باعث شکل‌گیری ریزساختاری جدید به همراه عیوبی احتمالی مانند تشکیل دندریت‌های درشت، حساس شدن، تشکیل مارتنزیت و رشد دانه می‌شود[4,8,9]. لذا فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW) با داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی مانند حرارت ورودی پایین به نظر جایگزین مناسبی با روش‌های متداول ذوبی می‌باشد. در این روش نیز مانند سایر روشهای تغییر شکل داغ، ریزساختار و بافت اولیه فلز به موجب تغییر شکل و یا رخداد مکانیزم‌های نرم شدن مانند بازیابی دینامیکی، تبلور مجدد دینامیکی دچار تغییر می‌شود[10,11]. در این راستا، چو (Cho) و همکارانش[5,12] نشان دادند که ریزساختار بسیار ظریفی در اثر تغییر شکل برشی شدید و وقوع تبلور مجدد دینامیکی در ناحیه همزده فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۰۹ شکل می‌گیرد.

با وجود اینکه در اندک کارهای صورت گرفته اطلاعات ارزشمندی در زمینه تحولات ریزساختاری فولادهای زنگ‌نزن فریتی در حین جوشکاری همزن اصطکاکی ارایه شده است، مطالعه حاضر سعی در تایید یافته‌های موجود و همچنین ارایه اطلاعات بیشتری در این زمینه با استفاده از آنالیز پراش الکترون‌های برگشتی (EBSD) می‌باشد.

روند آزمایشات

فولاد زنگ‌نزن دوفازی AISI ۴۳۰ به صورت ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها در ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر برای جوشکاری آماده شدند. فرایند جوشکاری در جهت نورد نمونه با سرعت جوشکاری ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخشی ۴۰۰ دور بر دقیقه به صورت بدون درز اعمال گردید. یک ابزار پایه کاربید تنگستنی با شانه ١٦ میلی‌متر و پین مخروطی با قطر ریشه ٤/۵ میلی‌متر و قطر نوک ۳/۵ میلی‌متر با ارتفاع ۱/۷ میلی‌متر به کار گرفته شد. ابزار زاویه ۳ درجه با جهت نرمال صفحه تحت جوشکاری دارد. در حین جوشکاری عمق فروروی ابزار به داخل نمونه ثابت وبرابر با ۱/۸ میلی متر در نظرگرفته شد. مشاهدات ریزساختاری عمدتا با میکروسکوپ الکترون روبشی مجهز به پراش الکترون‌های برگشتی در سطح مقطع عمود بر جهت جوشکاری (صفحه WD) انجام گردید. نمونه‌ها برای مشاهدات نوری بعد از سنباده‌زنی و پولیش با محلول حاوی ٥٦ گرم NaOH رقیق شده با آب مقطر تا ۱۰۰ میلی‌لیتر به مدت ۳۰ ثانیه با ولتاژ ۳ ولت حکاکی الکترولیتی شدند. برای انجام آنالیز پراش الکترون‌های برگشتی ابتدا به صورت مکانیکی با خمیر الماسه ۱ و ۰/۲۵ میکرونی پولیش شدند و در نهایت با محلول ۷۰۰ میلی‌لیتر اتانول، ۱۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر، ۱۰۰ میلی‌لیتر گلیسیرول و ۸۰ میلی‌لیتر پرکلریک اسید در دمای اتاق با ولتاژ ۳۵ ولت به مدت ۳۵ ثانیه به صورت الکترولیتی پولیش شدند.

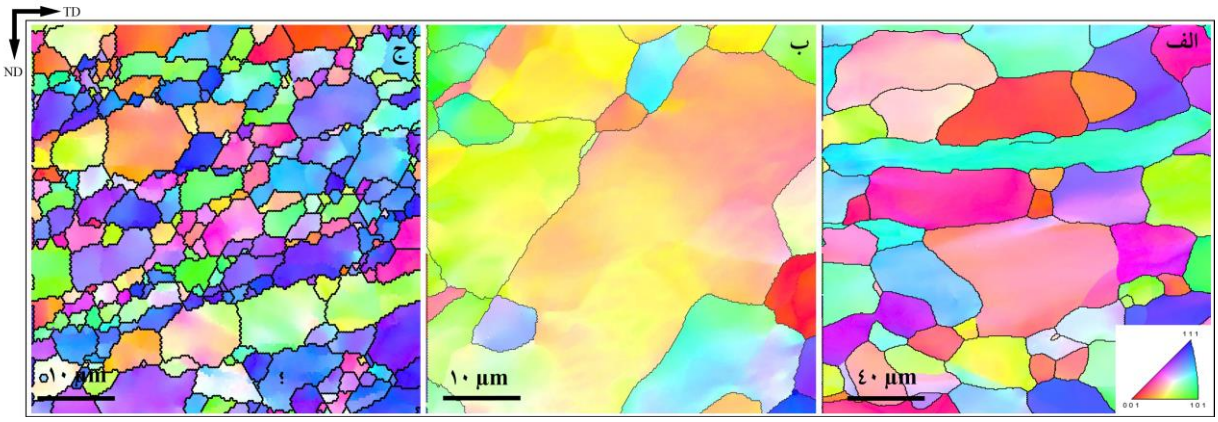
نتایج

شکل(۱) نواحی مختلف ریزساختاری در سمت پیشرونده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل دیده می‌شود که ریزساختار فلزپایه در اثر تغییر شکل پلاستیک شدیدی که توسط ابزار به ماده وارد می‌شود در هم شکسته می‌شود و سه ناحیه ریزساختاری متمایز همزده (SZ)، ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی (TMAZ) و فلز پایه (BM) در ناحیه اتصال شکل می‌گیرد. در ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی دانه‌های درشت و هم‌محور فلز پایه در امتداد کرنش اعمالی کشیده می‌شوند. کشیدگی دانه‌ها از مشخصه-

های بارز ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی می‌باشد که به علت ناکافی بودن کرنش اعمالی دانه‌ها عمدتا تغییر شکل می‌یابند ولی آثاری از تبلور مجدد نشان نمی‌دهند. همچنین دیده می‌شود که ریزساختار هم‌محور بسیار ظریفی در ناحیه همزده در اثر وقوع تبلور مجدد شکل یافته است. وجود چنین ریزساختار ظریف در ناحیه همزده و ساختار دانه‌ای کشیده فلز پایه در ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی سبب شکل‌گیری مرز مشخصی بین آنها شده است. رفتار مشابهی در جوشکاری همزن اصطکاکی آهن خالص[13] ، فولادهای زنگ‌نزن دوفازی[14-17]، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی[18,19] و فریتی[5,12] نیز گزارش شده است. شکل(۲) داده‌های آنالیز پراش الکترون‌های برگشتی بدست آمده برای فلز پایه و ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی از سطح مقطع عمود بر جهت نورد (WD-ND) را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل فریت در فلز پایه از دانه‌های هم محور با اندازه تقریباً ٥٦ میکرون تشکیل یافته است. رنگ هر دانه بر اساس جهتگیری کریستالی است که نسبت به جهت نورد (RD) دارد. همچنین با توجه به این شکل دیده می‌شود که ساختار لایه‌ای با دانه‌های کشیده ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی جای خود را به ریزساختاری هم-محور ریز در ناحیه همزده می‌دهد. افزایش کرنش از ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی به سمت ناحیه همزده و دمای بالا در این ناحیه باعث شکل‌گیری دانه‌های تبلور مجدد ریز هم‌محور در این ناحیه می‌شود. شکل‌گیری چنین رفتاری در توافق کلی با یافته‌های محققان پیشین می‌باشد[12,19].



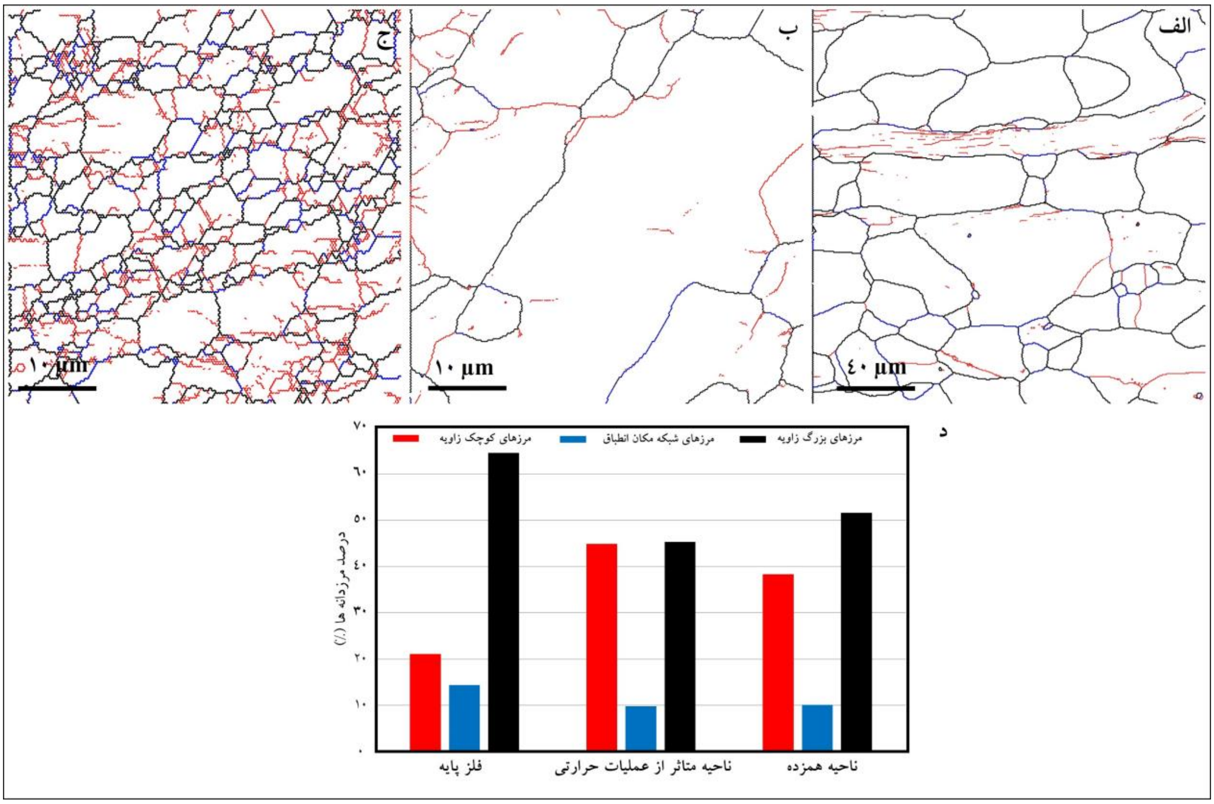
شکل ۱ تصاویر ریزساختاری بدست آمده از میکروسکوپ نوری الف) فلز پایه، ب) ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی و ج) ناحیه همزده



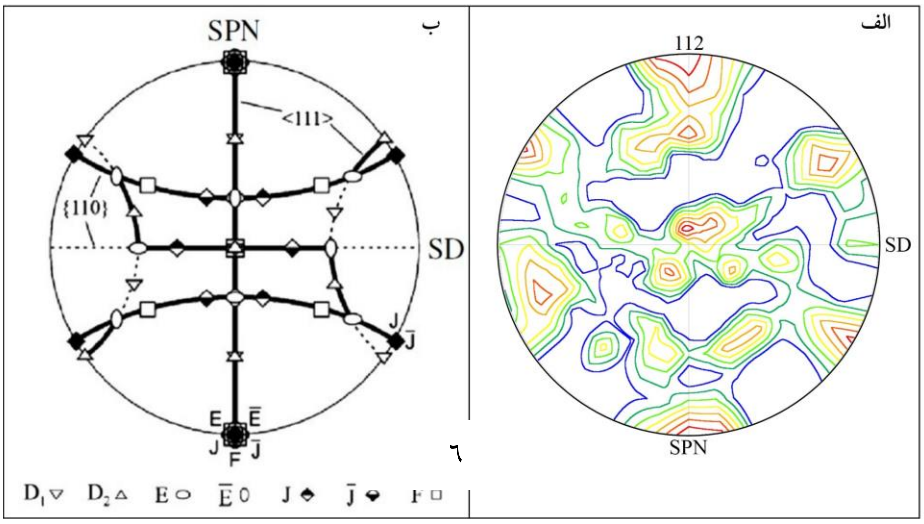
شکل ۲ نقشه‌های جهت‌گیری الف) فلز پایه ب) ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی ج) ناحیه همزده

نقشه‌های مرزدانه‌ای و همچنین نحوه توزیع کسر نوع مرزدانه‌ها (GBCD) در فلز پایه، ناحیه متاثر از عملیات حرارتی و ناحیه همزده در شکل(۳) نشان می‌دهند که اکثر مرزدانه‌ها در فلز پایه تقریبا ٦٥ ٪ مرزدانه‌های بزرگ زاویه و ١٤٪ مرزهای شبکه مکان انطباق هستند. وجود مقادیر قابل توجهی از مرزدانه‌های کوچک زاویه (حدود ۲۱ درصد) به همراه کسر بزرگی از مرزدانه‌های بزرگ زاویه نشان می‌دهند که فلز پایه در حین فرآوری احتمالا دچار تبلور مجدد شده است[20] . مطابق با این شکل، در ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی میزان مرزدانه‌های بزرگ زاویه به ٤٥ ٪ کاهش یافته و کسر بزرگتری از مرزدانه‌های کوچک زاویه (تقریبا ٤٥ ٪) در ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی شکل گرفته است که با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. شکل‌گیری کسر بالایی از چنین مرزدانه‌های فرعی کوچک زاویه به صورت ناگهانی به احتمال زیاد مربوط به وقوع فرآیند بازیابی دینامیکی می‌باشد. چنین رفتاری در ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی آهن خالص[13]، فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵[14] و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰٤ [19] نیز گزارش شده است. ساختارهای فرعی (مرزدانه‌های کوچک زاویه) با شروع اعمال کرنش با برهمکنش نابجاییهای ایجاد شده در دمای بالای جوشکاری شکل می‌گیرند و نابجاییهای غیرهم علامت تولید شده در حین تغییر شکل همدیگر را حذف کرده و نابجاییهای هم علامت خود را دیواره از مرزهای فرعی با انرژی کم قرار می‌دهند[11,21] . همچنین، فراوانی مرزهای بزرگ زاویه و مرزهای شبکه مکان انطباق با ورود به ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی کاهش می‌یابند. در رابطه با توجیه این رفتار می‌توان گفت که ابزار در حال چرخش باعث درهم شکسته شدن ساختار فلز پایه در ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی شده است. همچنین داده‌های آماری مرزدانه‌ها در شکل (۳) نشان می‌دهد که فراوانی مرزدانه‌های بزرگ زاویه و کوچک زاویه در ناحیه همزده نسب به ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی به ترتیب افزایش و کاهش یافته‌اند. این رفتار به طور ضمنی نشان می‌دهد که مرزدانه‌های بزرگ زاویه بواسطه مصرف مرزدانه‌های کوچک زاویه شکل یافته‌اند. در فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی، ابزار جوشکاری تغییرشکل شدیدی را بر ماده اعمال می‌کند. این تغییرشکل سبب چرخش شبکه بلوری و تغییر بافت اولیه ماده اولیه می‌شود. در این راستا شکل‌های قطبی ابزار مناسبی برای نمایش دادن و مطالعه بافت ماده به شمار می‌آیند[10]. شکل (٤) تصاویر قطبی مربوط به صفحات {۱۱۲} را در ناحیه ریزساختاری همزده بعد از اعمال چرخش‌های مناسب جهت انطباق با سیستم برشی را نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که بافت ایجاد شده در ناحیه همزده، مشابه با بافت فلزات bcc در آزمون پیچش، نتیجه تغییرشکل برشی ساده بوده که عمدتاً چرخش پین آن را به وجود آورده است. از آنجا که توسعه اجزای بافت تغییرشکلی به عنوان نشانه‌ای از فعال شدن سیستمهای لغزشی در حین تغییرشکل تلقی می‌شود، مشاهدات فوق نتیجه می‌دهد که در ناحیه همزده، سیستم لغزشی فعال شده شامل صفحات و یا جهات {۱۱۲} می‌باشد. با توجه به قسمت ب شکل ٤ مشخص می‌شود که اجزای بافت برشی ساده در فلزات bcc در داخل رشته‌های ناقص <۱۱۱>{hkl} و <uvw>{۱۱۰} قرار دارد. بنابراین، سیستم‌های لغزشی فعال شده می‌تواند یکی از سیستم‌های <۱۱۱>{۱۱۲} و یا <۱۱۲>{۱۱۰} باشد [۱۰،۱۱]. بافت برشی در نواحی همزده فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۰٤L [22]، آهن خاص[13]، فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ [14] و فولاد زنگ‌نزن فریتی ٤۰۹ [5,12] گزارش شده است. برای مطالعه بافت برشی، سیستم مختصات را از سیستم مختصات جوشکاری (ND–TD–WD) به سیستم مختصات برشی (SPN-SD) باید تغییر داد. به دلیل شکل هندسی ابزار ناحیه همزده دارای شکل مخروط ناقص است. سطح جانبی این مخروط به عنوان صفحه برشی و جهت برش مماس بر سطح جانبی و در جهت چرخش می‌باشد. لذا جهت برش

در مرز بین ناحیه متـاثر از عملیـات ترمومکـانیکی و ناحیـه همزده هر دو سمت ناحیـه جـوش در جهـت جوشـکاری قرار می‌گیرد و در مرکز ناحیه همـزده در راسـتای TD قـرار می‌گیرد[13,14].



شکل ۳ نقشه‌های مرزدانه‌ای: الف) فلز پایه، ب) **متاثر از عملیات ترمومکانیکی** ، ج) **همزده** و د) نحوه توزیع کسر نوع مرزدانه‌ها (GBCD)



شکل ٤ الف) تصویر قطبی صفحات ۱۱۲ در مرکز ناحیه همزده ب) تصویر قطبی صفحات ۱۱۰ که جهت‌گیریهای ایده‌ال در بافت برشی ساده برای فلزات bcc را نشان می‌دهد

نتیجه‌گیری

ریزساختار ناحیه جوش فولاد زنگ‌نزن آستنیتی در فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی مطالعه گردید. کسر بزرگی از مرزدانه‌های کوچک زاویه در اثر وقوع بازیابی دینامیکی در ناحیه متاثر از عملیات ترمومکانیکی شکل گرفت. اصلاح ریزساختاری شدیدی در ناحیه همزده صورت گرفت و دانه‌های هم‌محور ریزی در اثر وقوع تبلور مجدد دینامیکی در این ناحیه توسعه یافتند. تصویر قطبی نشان داد که نوعی بافت برشی ساده در مرکز ناحیه ریزساختاری همزده در اثر تغییر شکل اعمال شده توسط ابزار ایجاد شده است.

مراجع

1. Lewis D.B., Pickering F.B., "Development of recrystallization textures in ferritic stainless steels and their relationship to formability", *Metals Technology*, Vol. 10, pp. 264-273, (1983).
2. Siqueira R.P., Sandima H.R.Z., Oliveira T.R., Raabe D., "Composition and orientation effects on the final recrystallization texture of coarse-grained Nb-containing AISI 430 ferritic stainless steels", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 3513-3519, (2011).
3. Yan H., Bib H., Li X., Xu Z., "Microstructure and texture of Nb+Ti stabilized ferritic stainless steel", *Materials Characterization*, Vol. 59, pp. 1741-1746, (2008).
4. Park S.H.C., Kumagai T., Sato Y.S., Kokawa H., Okamoto K., Hirano S., Inagaki M., "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 430 stainless steel", *International Society of Offshore and Polar Engineers*, Korea, (2005).
5. Cho H.H., Hana H.N., Hong S.T., Park J.H., Kwon Y.J., Kim S.H., Steel R.J., "Microstructural analysis of friction stir welded ferritic stainless steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528 pp. 2889-2894, (2011).
6. Mohandas T., Reddy G.M., Navee M., "A comparative evaluation of gas tungsten and shielded metal arc welds of a ferritic stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 94, pp. 133-140, (1999).
7. Yana H., Bi H., Li X., Xu Z., "Effect of two-step cold rolling and annealing on texture, grain boundary character distribution and r-value of Nb+Ti stabilized ferritic stainless steel", *Materials Characterization*, Vol. 60, pp. 65-68, (2009).
8. Kou S., "Welding metallurgy second edition", Springer, New Jersey, pp. 446-450, (2003).
9. Bilgin M.B., Meran C., "The effect of tool rotational and traverse speed on friction stir weldability of AISI 430 ferritic stainless steels", *Materials and Design*, Vol. 33, pp. 376-383, (2012).
10. Suwas S., Ray R.K., "Crystallographic texture of materials", Springer, London, pp. 95-137, (2014).
11. Humphreys F.J., Hatherly M., "Recrystallization and related annealing phenomena", Springer, Oxford, pp. 67-86, (2004).
12. Cho H.H., Hong S.T., Roh J.H., Choi H.S., Kang S.H., Steel R.J., Han H.N., "Three-dimensional numerical

and experimental investigation on friction stir welding processes of ferritic stainless steel", *Acta Materialia*, Vol. 61, pp. 2649-2661, (2013).

13. Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H., "Microstructural evolution during friction stir-processing of pure iron", *Acta Materialia*, Vol. 56, pp. 2602-2614, (2008).
14. Saeid T., Abdollah-zadeh A., Shibayanagi T., Ikeuchi K., Assadi H., "On the formation of grain structure during friction stir welding of duplex stainless steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 6484-6488, (2010).
15. Sato Y.S., Nelson T.W., Sterling C.J., Steel R.J., Pettersson C.O., "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 397, pp. 376-384, (2005).
16. Santos T.F.A., Torres E.A., Lippold J.C., Ramirez A.J., "Detailed Microstructural Characterization and Restoration Mechanisms of Duplex and Superduplex Stainless Steel Friction-Stir-Welded Joints", *Journal of Materials Engineering and Performance*, (2016).
17. Santos T.F.A., López E.A.T., Fonseca E.B., Ramirez A.J., "Friction stir welding of duplex and superduplex stainless steels and some aspects of microstructural characterization and mechanical performance", *Materials Research*, Vol. 19, Issue 1, pp. 117-131, (2016).
18. Rezaei-Nejad S., Abdollah-zadeh A., Hajian M., Kargar F., Seraj R., "Formation of Nanostructure in AISI 316L Austenitic Stainless Steel by Friction Stir Processing", *Procedia Materials Science*, Vol. 11, pp. 397-402, (2015).
19. Liu F.C., Nelson T.W., "In-situ grain structure and texture evolution during friction stir welding of austenite stainless steel", *Materials & Design*, Vol. 115, pp. 467-478, (2017).
20. Mirzadeh H., Cabrera J.M., Najafizadeh A., Calvillo P.R., "EBSD study of a hot deformed austenitic stainless steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 538, pp. 236-245, (2012).
21. Jorge-Badiola D., Iza-Mendia A., Gutierrez I., "Study by EBSD of the development of the substructure in a hot deformed 304 stainless steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 394, pp. 445-454, (2005).
22. Sato Y.S., Nelson T.W., Sterling C.J., "Recrystallization in type 304L stainless steel during friction stirring", *Acta Materialia*, Vol. 53, pp. 637-645, (2005).